



Energía Nuclear

Julio Vergara Aimone



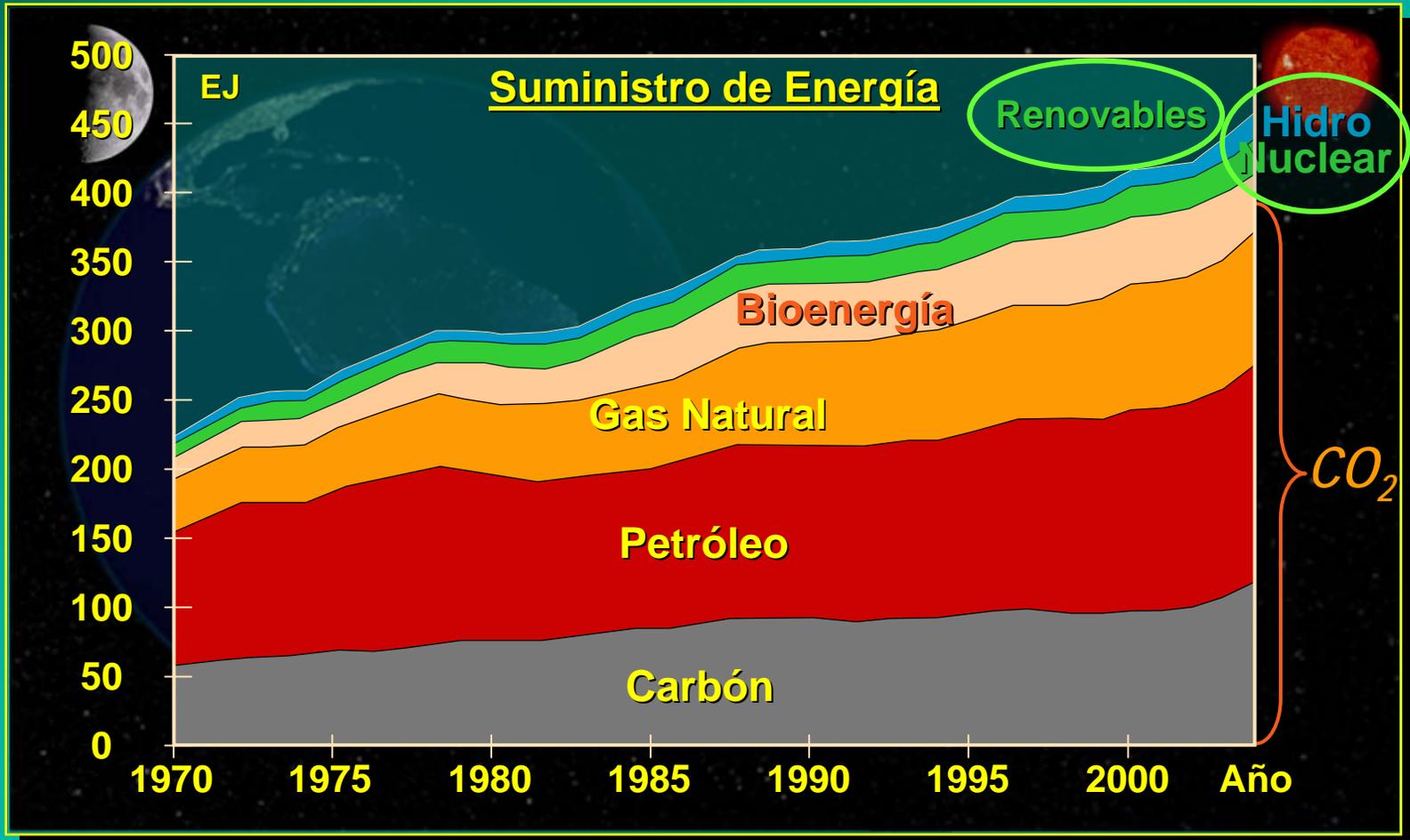
Santiago, 7 de Marzo del 2007



Introducción



Combustibles fósiles = 3/4 de la producción total

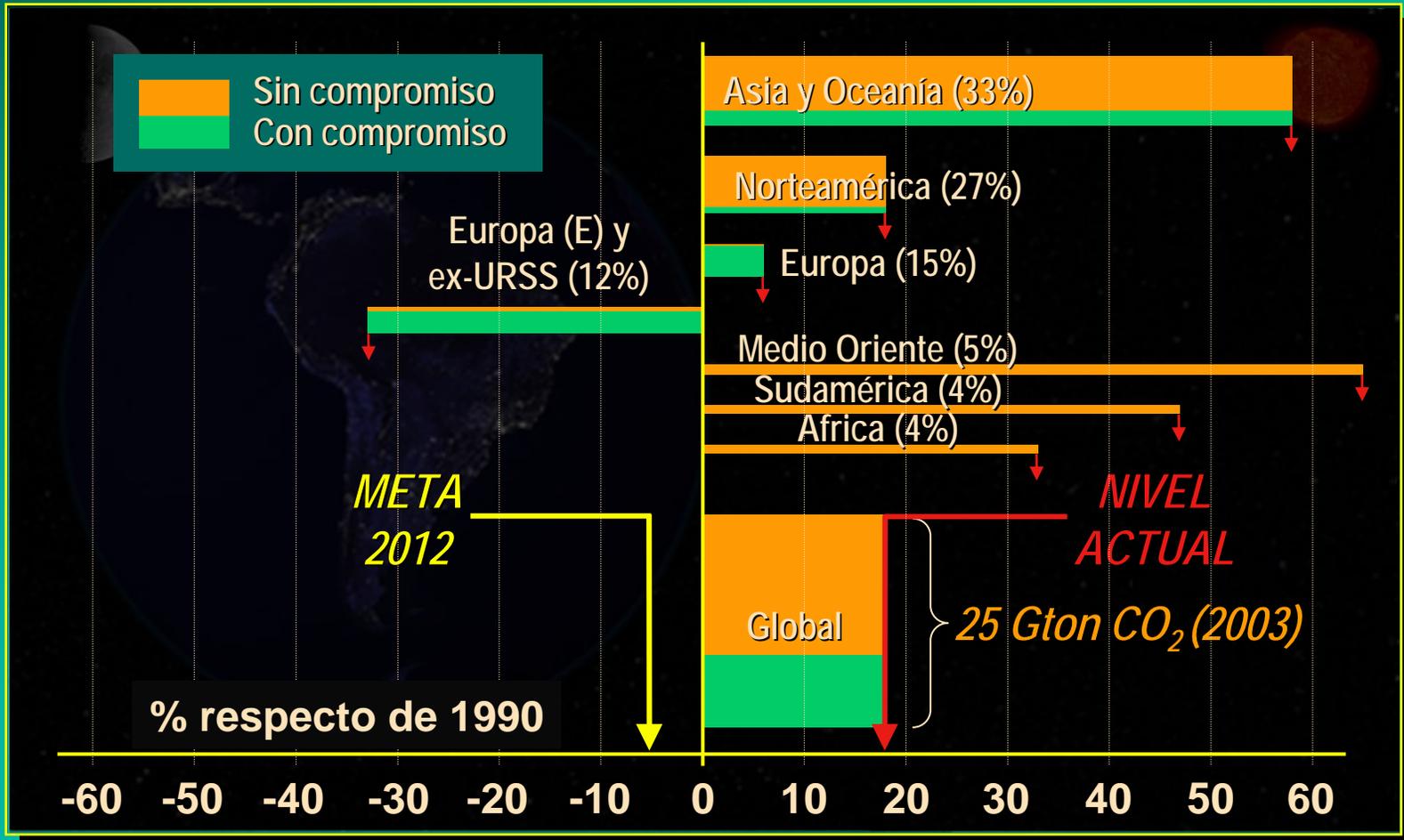




Introducción



Respuesta global actual al Protocolo de Kioto



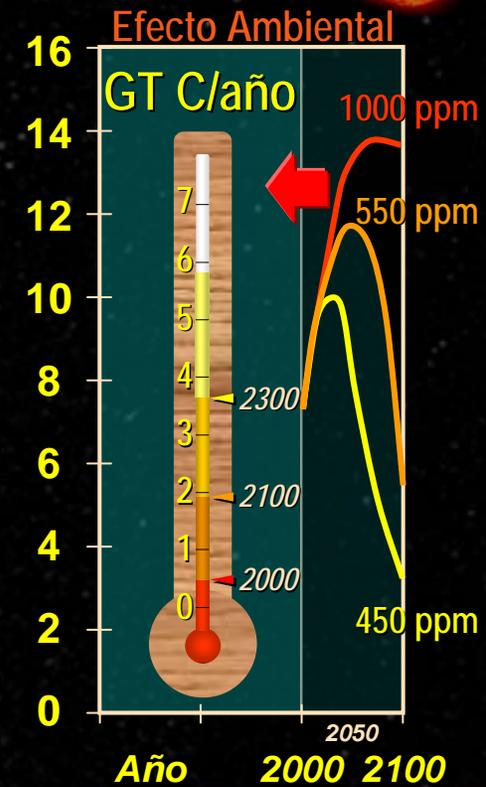
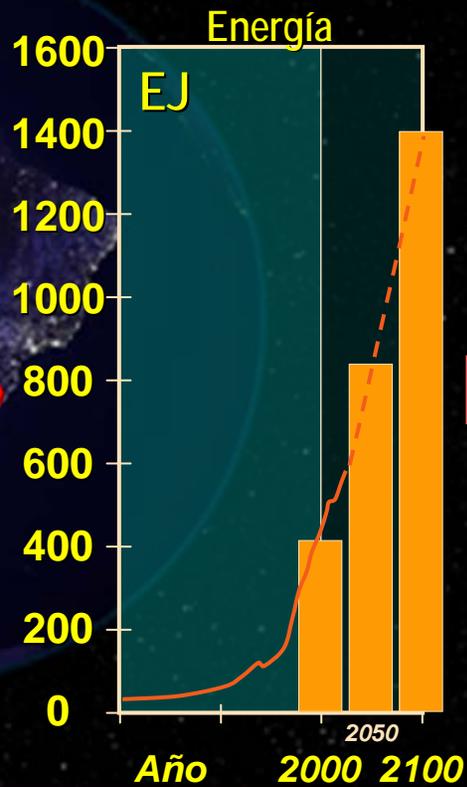
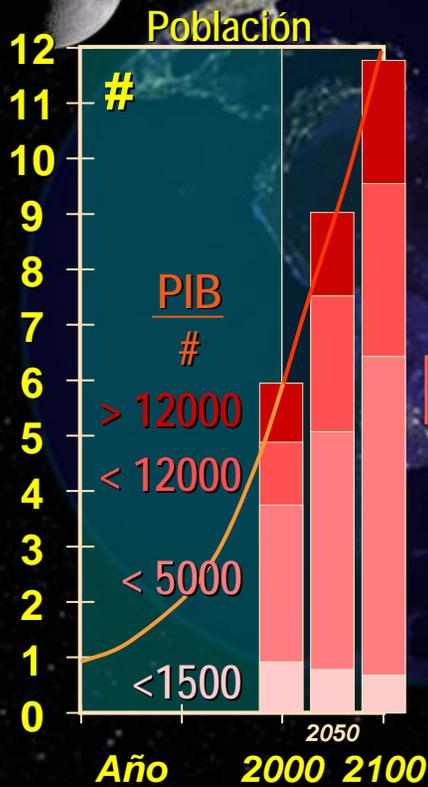


Introducción



La demanda energética tenderá a crecer más

“población → consumo → efectos”



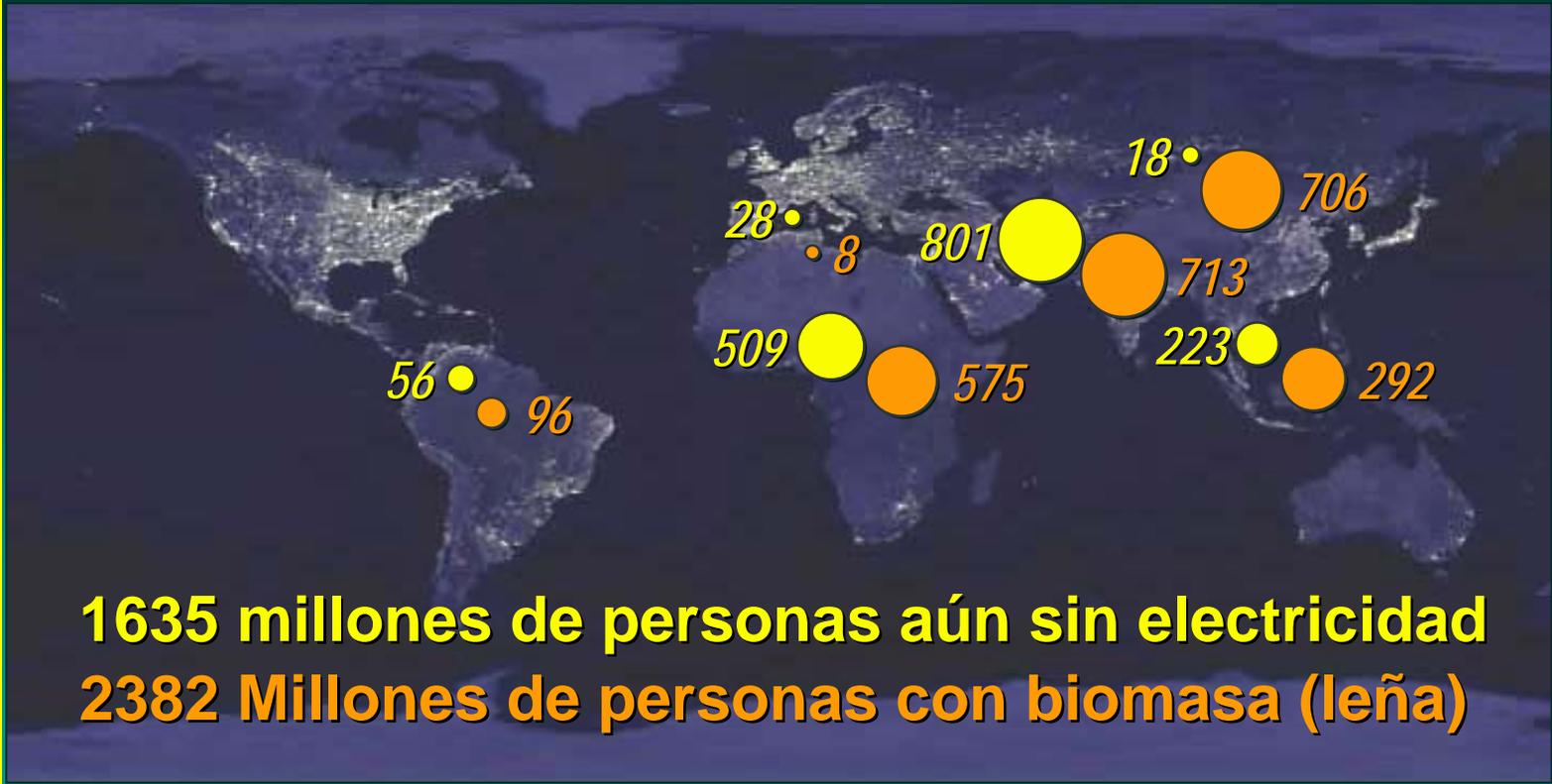


Introducción



Y si a esto sumamos a los que no tienen energía

Desigualdad del consumo energético global



1635 millones de personas aún sin electricidad
2382 Millones de personas con biomasa (leña)



Introducción



Integrando más efectos sobre el ecosistema

Posibles efectos (algunos):

- *Alza de temperatura, humedad y lluvias.*
- *Degradación del permafrost.*
- *Emisión de metano retenido.*
- *Desplazamiento de la vegetación.*
- *Cambios en especies, unas por otras.*
- *Derretimiento de glaciares y hielos.*
- *Aumento del nivel del mar.*
- *Baja de salinidad en zonas críticas.*
- *Posible falla de corrientes termohalinas.*
- *Posible enfriamiento abrupto.*



Introducción



La alteración climática supera los ciclos naturales





Introducción



Energía nuclear debe aumentar su aporte

We can not continue drawing energy from fossil fuels and there is no chance that the renewables can provide enough energy and in time. If we had 50 years or more we might make these our main sources. But we do not have so.

Let us use the small input from renewables sensibly, but only one immediately available source does not cause global warming and that is:

Nuclear Energy

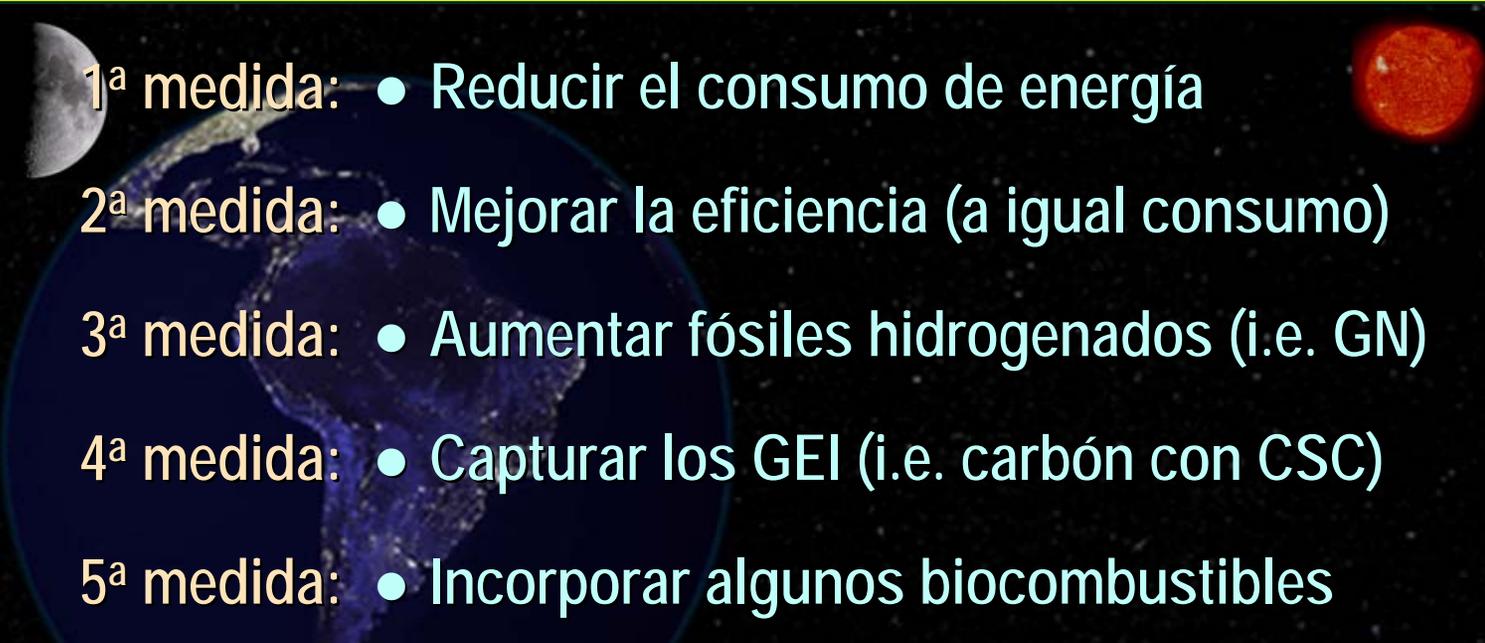
James Lovelock
Autor de la Teoría GAIA



Energía Nuclear

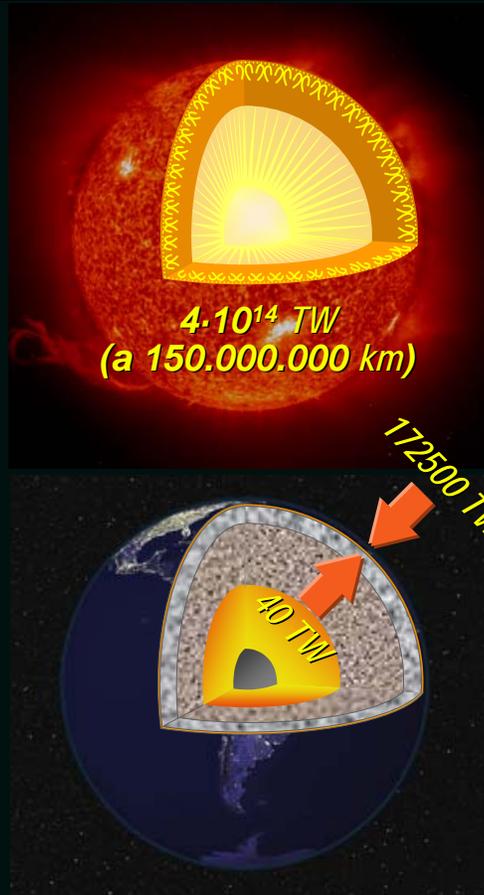


Medidas para mejorar la sustentabilidad

- 
- 1ª medida: ● Reducir el consumo de energía
 - 2ª medida: ● Mejorar la eficiencia (a igual consumo)
 - 3ª medida: ● Aumentar fósiles hidrogenados (i.e. GN)
 - 4ª medida: ● Capturar los GEI (i.e. carbón con CSC)
 - 5ª medida: ● Incorporar algunos biocombustibles
 - 6ª medida: ● **Reducir el carbono (i.e. H₂)**
 - 7ª medida: ● **Incorporar más fuentes sin GEI**



Energía nuclear desde el inicio



- **Fusión nuclear :**
“energía externa”
Estimula la hidrología, el viento, las olas, provee energía FV, fósiles, etc...

- **¿¿ Fisión ?? nuclear :**
“energía terrestre”
Estimula la energía geotérmica ... de paso activa un geodínamo protector.



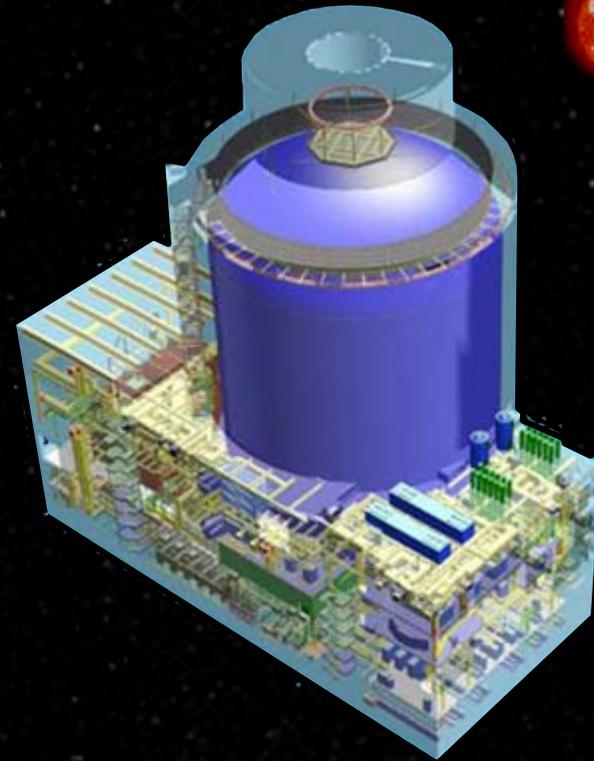
Energía Nuclear



440+ reactores generan 6% de la energía primaria



Fusión



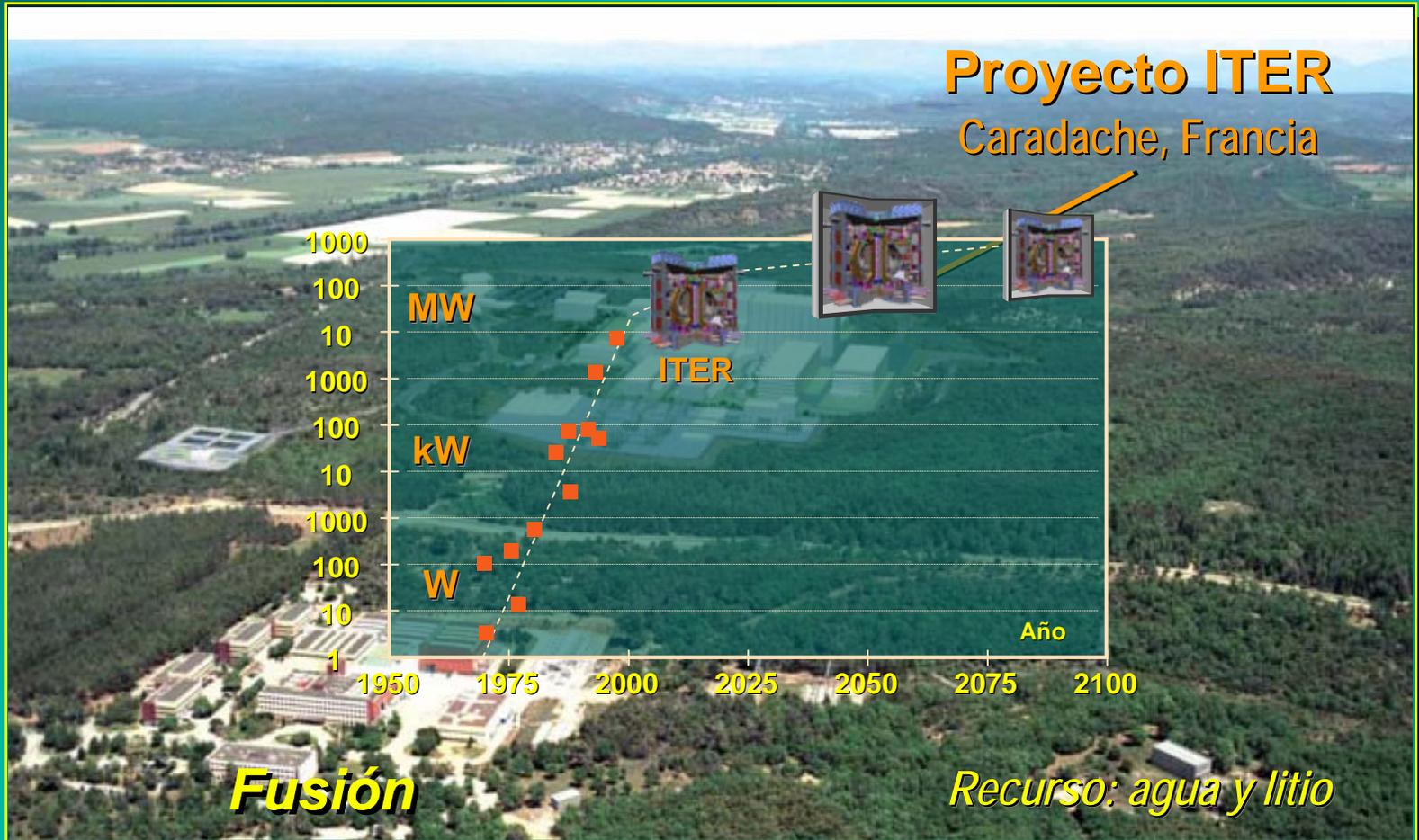
Fisión



Energía Nuclear



Con autonomía indefinida a muy largo plazo





Energía Nuclear



Y buenas perspectivas al mediano plazo

Olkiluoto 3
1600 MW, Finlandia



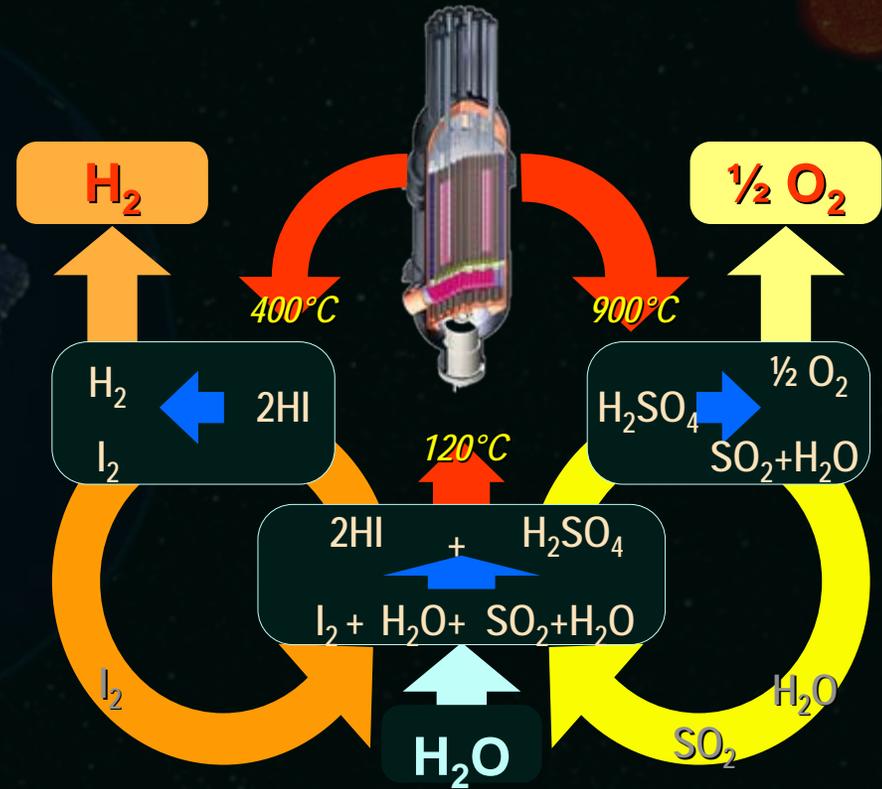
Energía Nuclear



Con posibilidades más allá de la electricidad



VHTGR = 7-12 \$/GJ
 Carbón = 6-12 \$/GJ
 SRM = 7-10 \$/GJ
 Otros = 9-30 \$/GJ

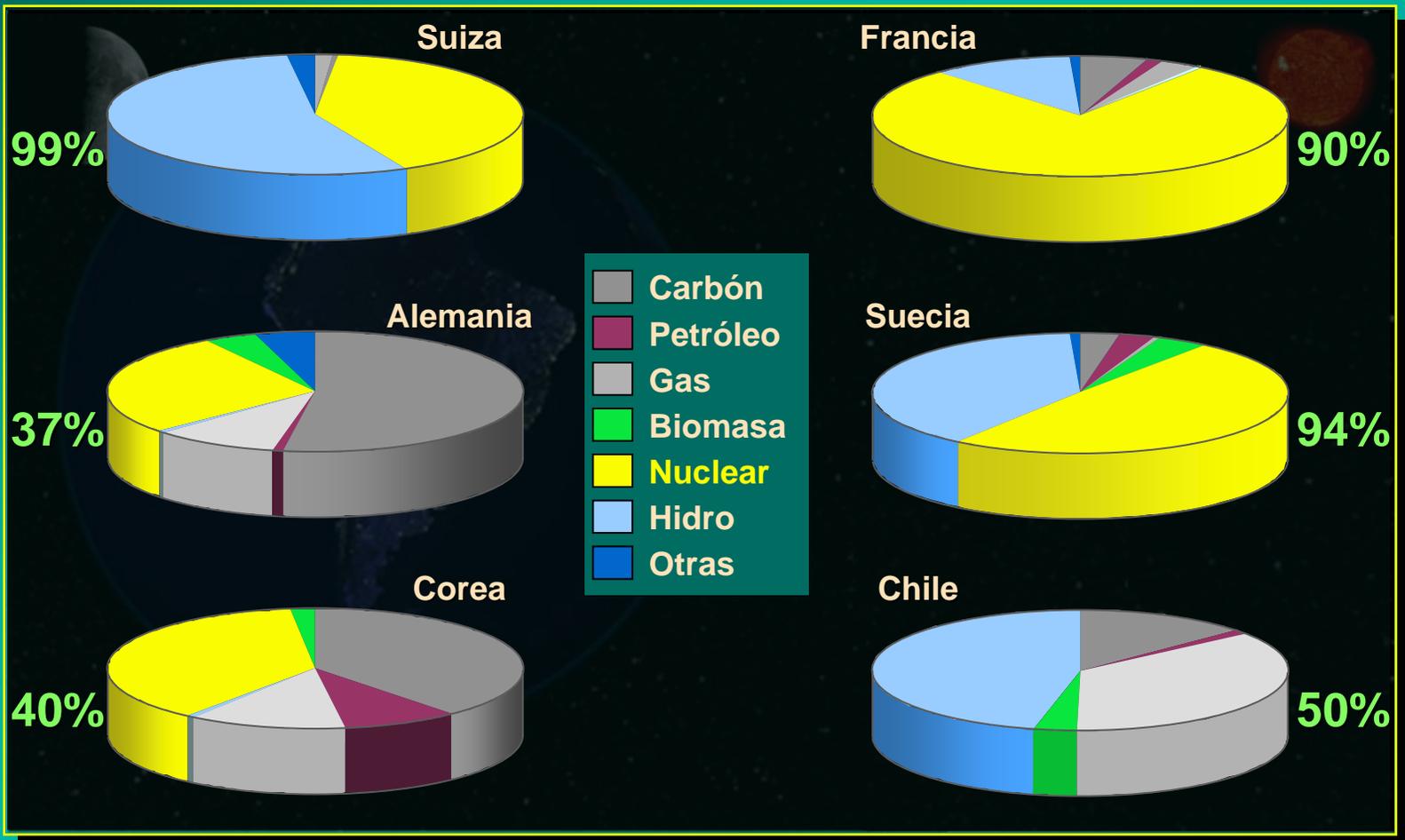




Energía Nuclear



Cada país con su fórmula electricidad-ambiente





Energía Nuclear



Nueva tendencia: “renacimiento nuclear”

- Problemas de seguridad internacional,
- Creciente costo de los combustibles fósiles,
- Buen desempeño de la tecnología nuclear,
- Extensión de vida y aumento de potencia,
- Comprensión sobre Chernobyl (20 años),
- Costo y escala de opciones renovables,
- Amenaza de cambio climático abrupto,
- Costos e impactos globales (Stern Review)
- Ambientalistas a favor de esta opción,
- Países líderes (EUA, UK, G8, Australia, etc.),
- Resultado: **130 posibles reactores al MP.**



Energía Nuclear

Energía nuclear ofrece oportunidades amplias



Electricidad, libre de CO₂
Calor industrial y urbano

Producción de H₂ (autos)
Propulsión de naves

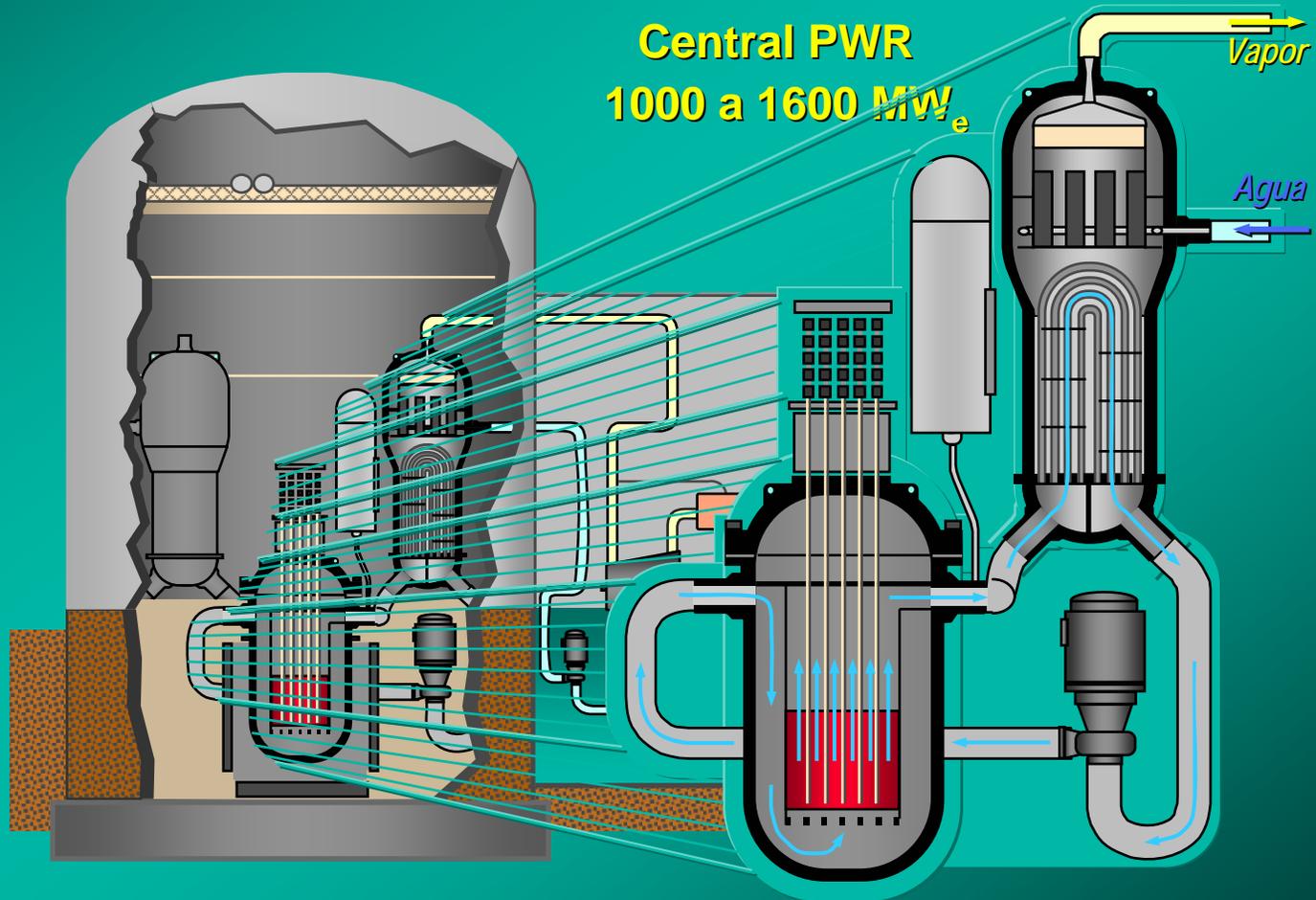
Desalinización por osmosis,
destilación, híbridos, etc.

Tecnología, materiales, co-
nocimiento, servicios, etc.

Centrales Nucleares



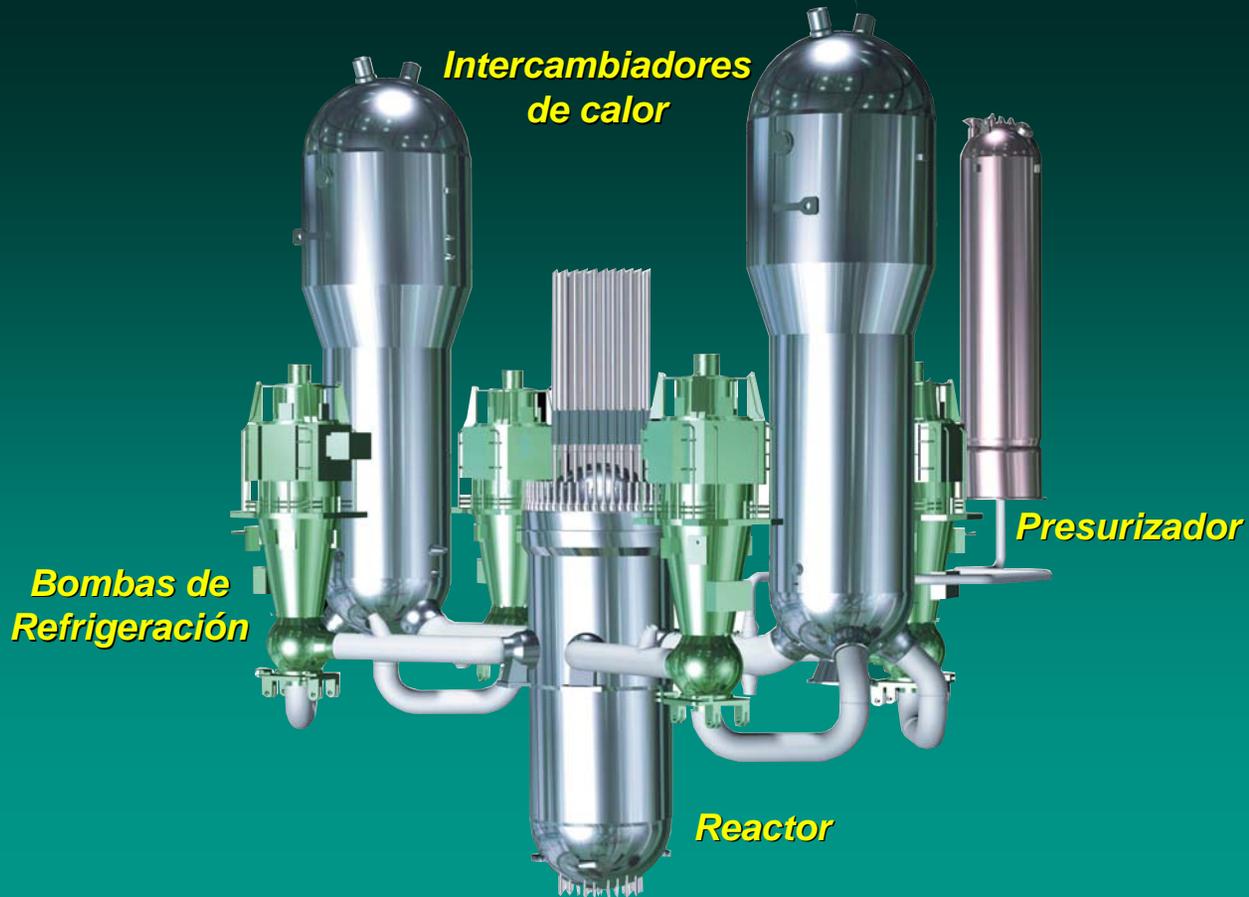
Diseño dominante en tecnología nucleoelectrica





Centrales Nucleares

Reactores de última generación





Centrales Nucleares

Reactores de última generación





Centrales Nucleares



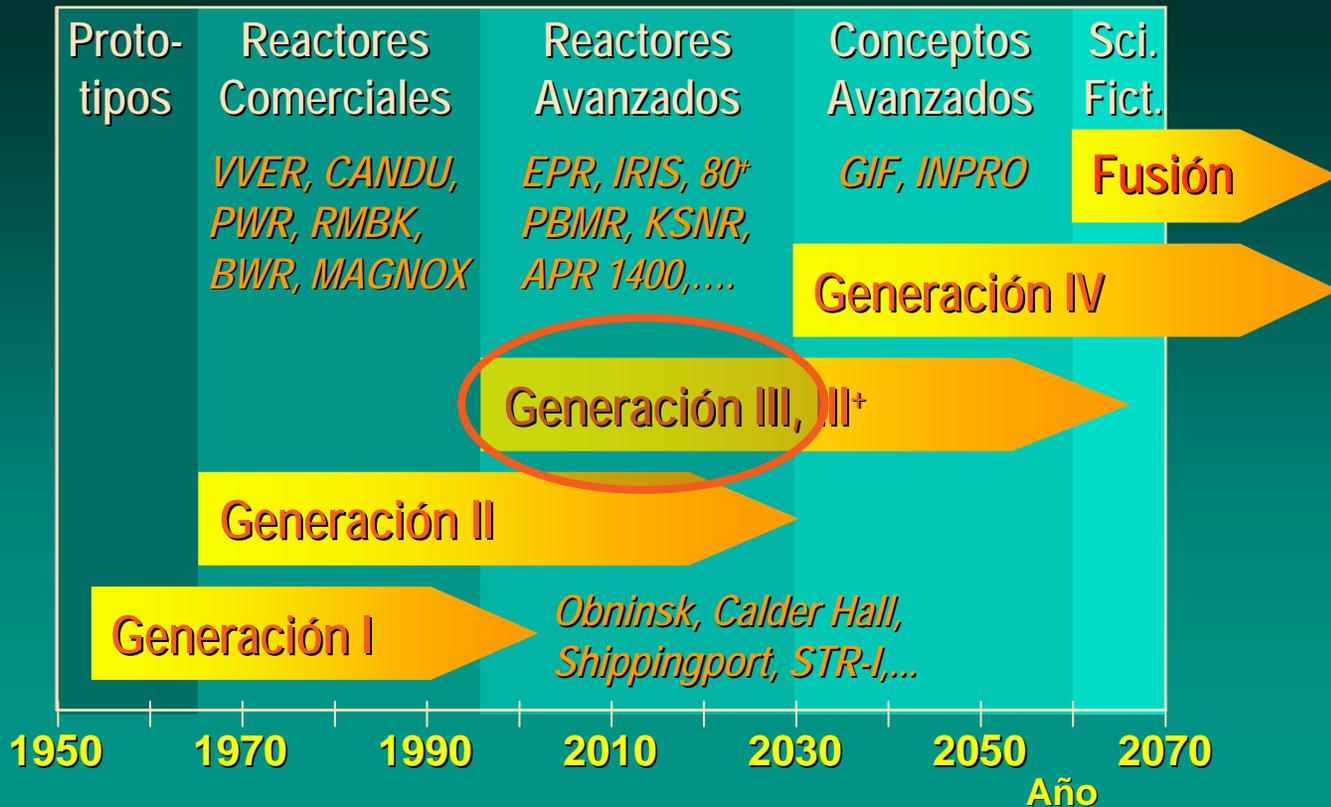
Reactores nucleares en operación, por tipo

Tipo de Reactor	Países	#	GW	Combustible	Refrigerante	Moderador
Agua a presión (PWR-VVER)	EUA, Francia, Japón, Rusia	267	242	UO ₂ (LEU)	Agua	Agua
Agua en ebullición (BWR)	EUA, Japón, Suecia	94	84	UO ₂ (LEU)	Agua	Agua
Agua pesada a presión (PHWR-CANDU)	Canadá, India, Corea, China, Argentina	41	21	UO ₂ (natural), UO ₂ (SEU)	Agua pesada	Agua pesada
Gas-grafito (GCR, AGR & Magnox)	Reino Unido	22	11	U (natural), UO ₂ (LEU)	CO ₂	Grafito
Agua a presión y grafito (LWGR)	Rusia	16	11	UO ₂ (LEU)	Agua	Grafito
De espectro rápido (FBR)	Japón, Rusia, Francia	3	1	PuO ₂ y UO ₂	Sodio líquido	No
	TOTAL	443	370			



Centrales Nucleares

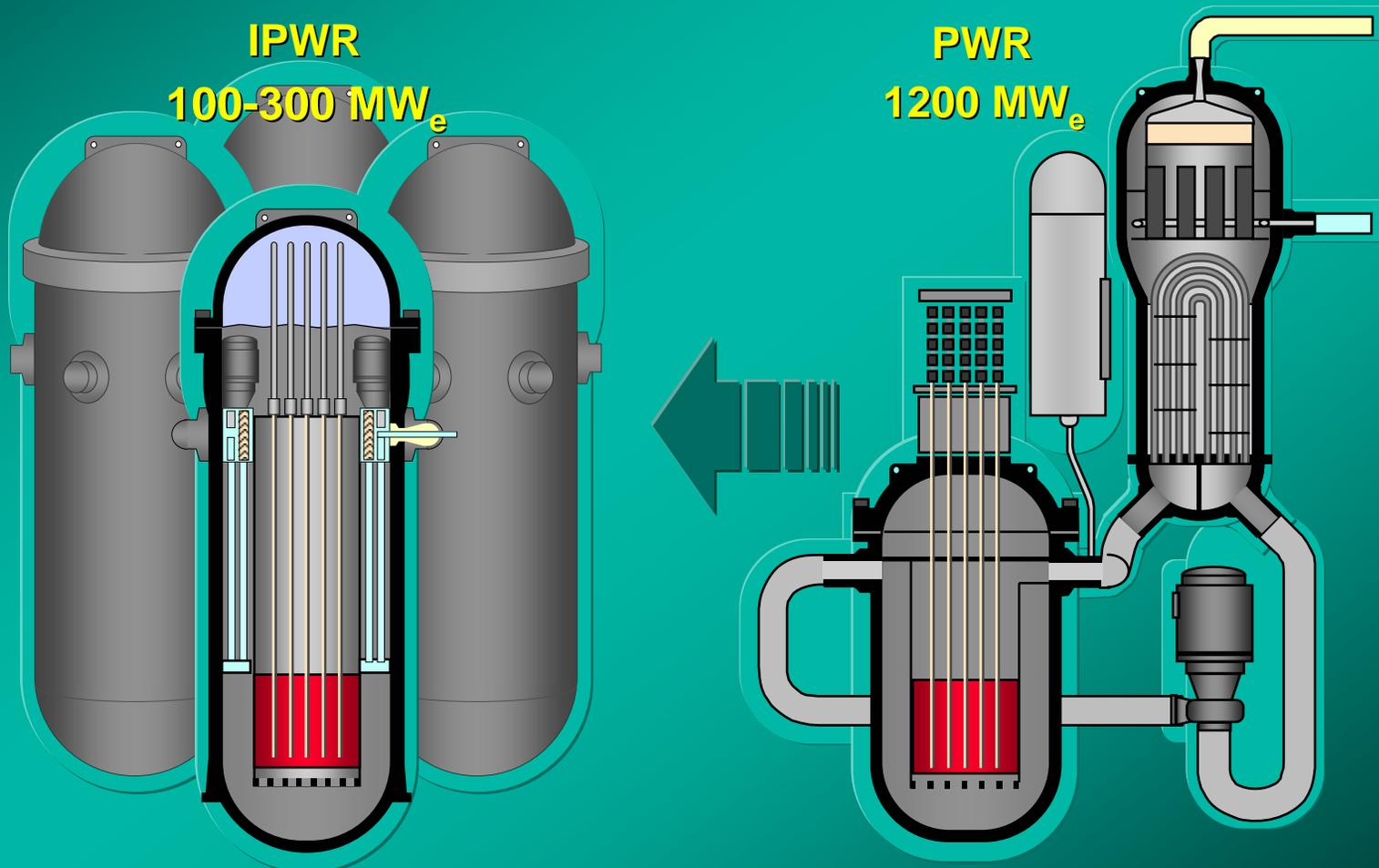
Evolución de la tecnología nuclear dominante



Centrales Nucleares



El IPWR cumpliría nuevos requisitos de diseño

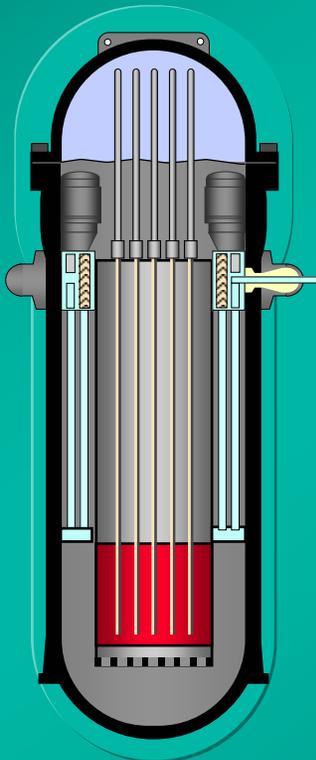


Centrales Nucleares



Similarmente eficiente, pero más competitivo

IPWR



PWR Integral, apto para redes pequeñas:

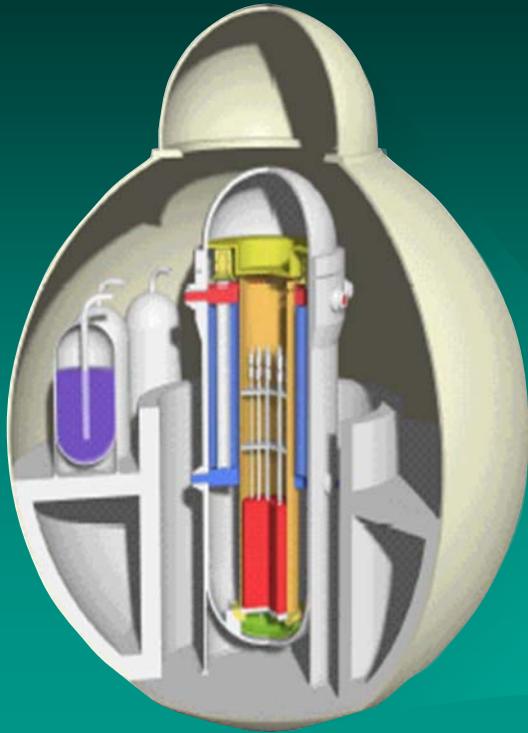
- Más resistente a sismos.
 - Mejor seguridad nuclear.
 - Mejor confinamiento.
 - Mejor rendimiento térmico.
 - Menos circuitos y sistemas.
 - Fácil de montar y desarmar.
 - Etc...
- + SEGURO, + SIMPLE, + BARATO



Centrales Nucleares

De dimensiones relativamente compactas

Ejemplo: Reactor IRIS



5 MW

ϕ 126 m
7-12 rpm

400 ton

300 ton

120 m

1300 m³ concreto
120 tons de acero

335 MW



Centrales Nucleares

Capacidad para entregar potencia y calor

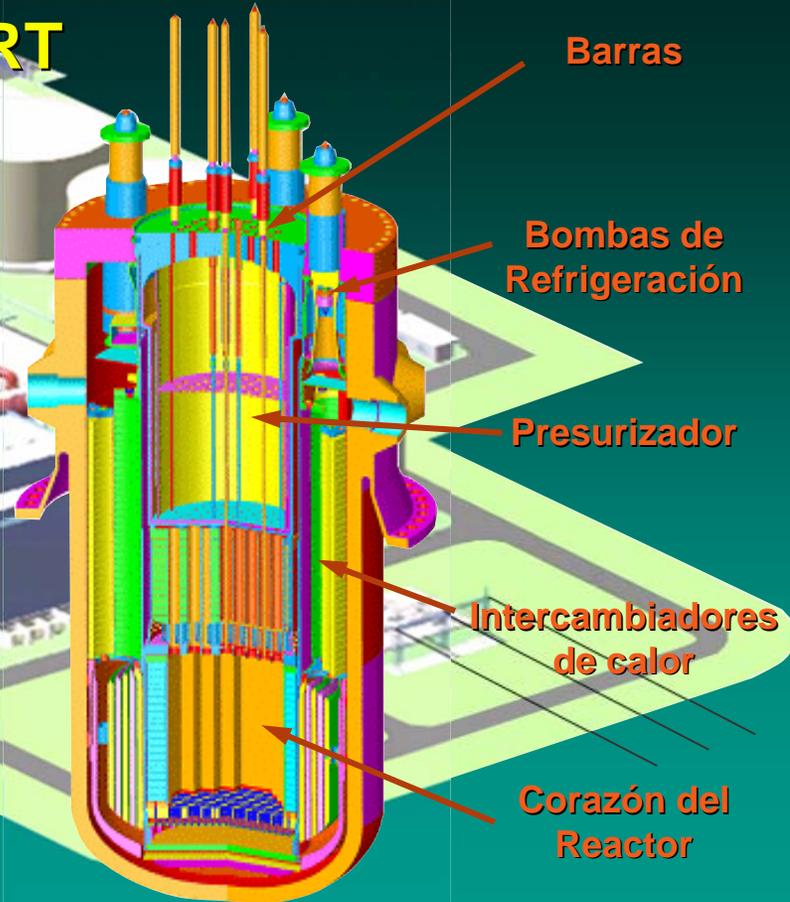
Ejemplo: Reactor SMART

Planta
Desalinizadora

Planta
Generadora

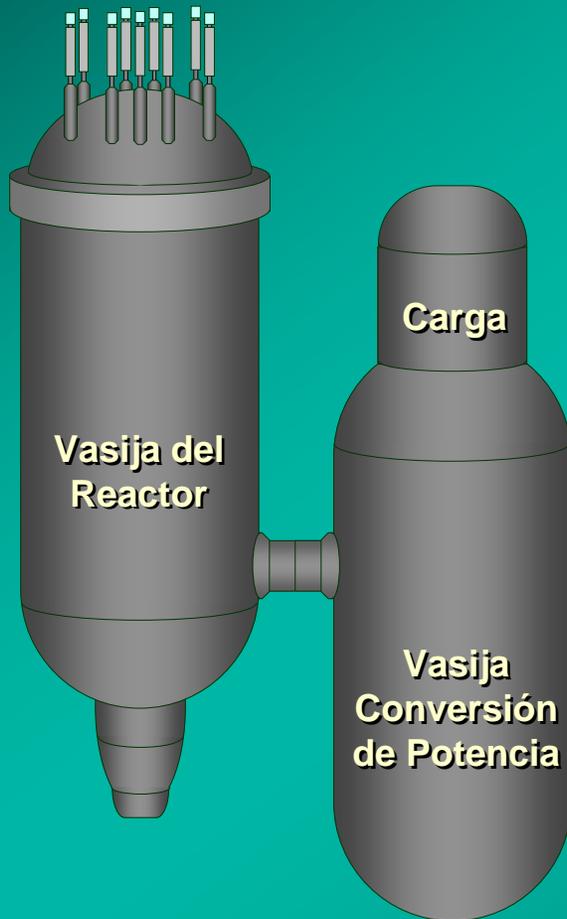
$200 MW_e$

$180 MW_e + 80000 \text{ Ton/día}$





El HTGR-ICR cumpliría mejor los requisitos



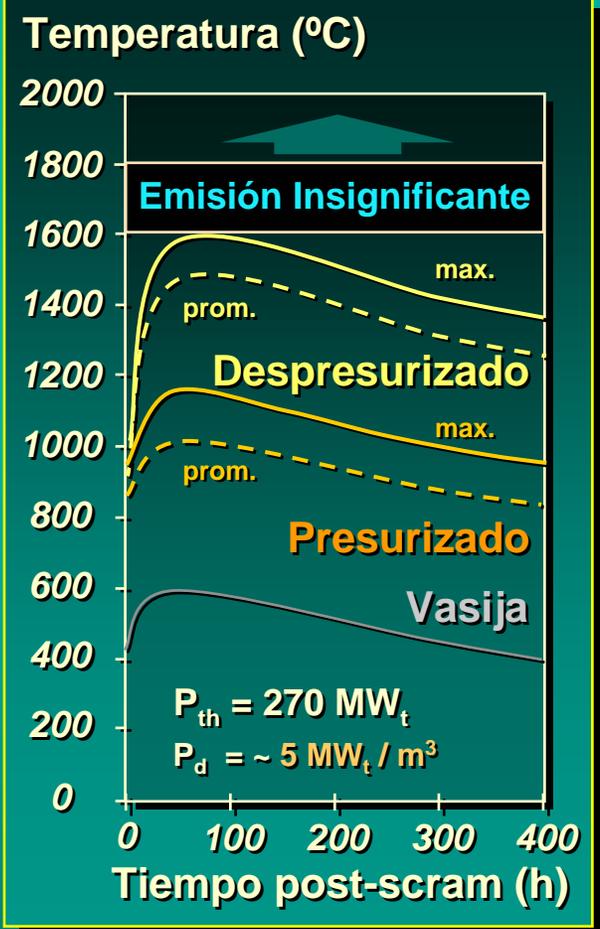
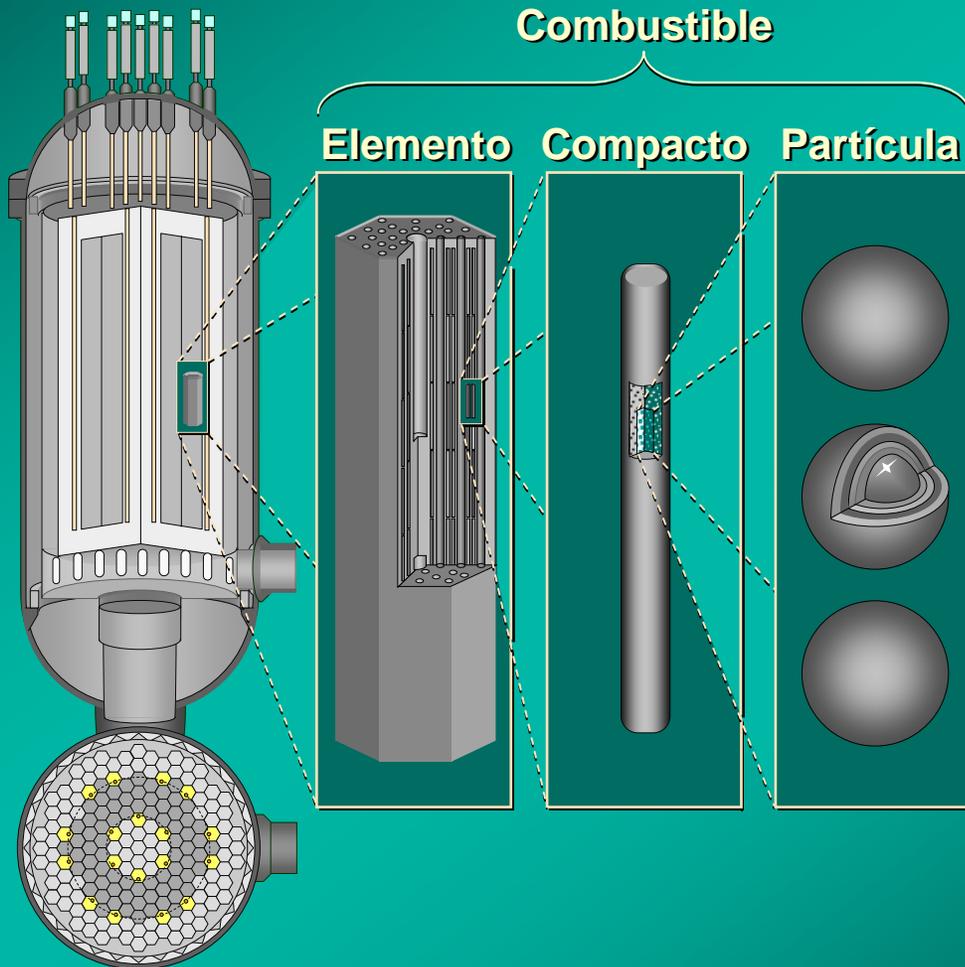
Este tipo también sería apto para tales redes + calor:

- **Mayor seguridad nuclear.**
- **Excelente eficiencia.**
- **Calor industrial de calidad.**
- **Componentes estándares.**
- **Menos sistemas auxiliares.**
- **Gestión de Combustible.**
- **Etc...**

++ SEGURO, ++ SIMPLE, ++ BARATO

Centrales Nucleares

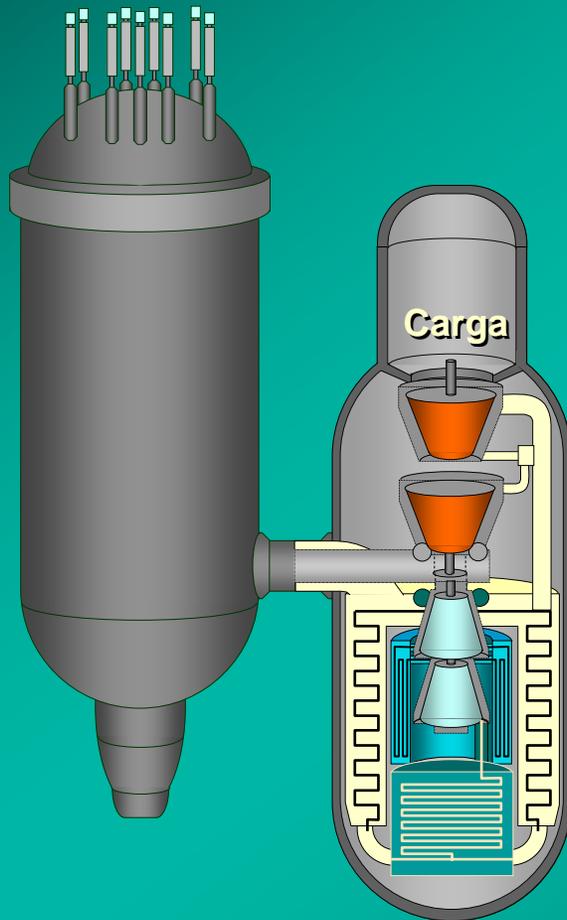
El HTGR-ICR cambia el paradigma de la seguridad



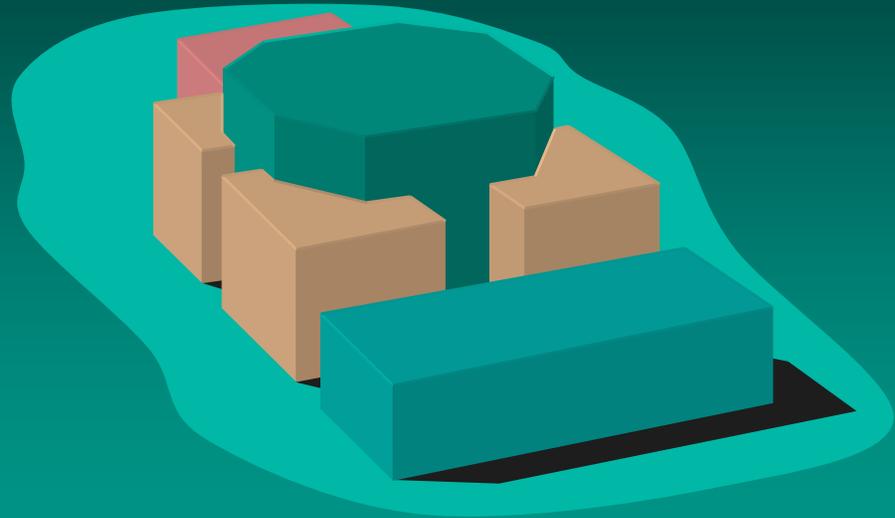
Centrales Nucleares



El HTGR-ICR se perfila aún más competitivo



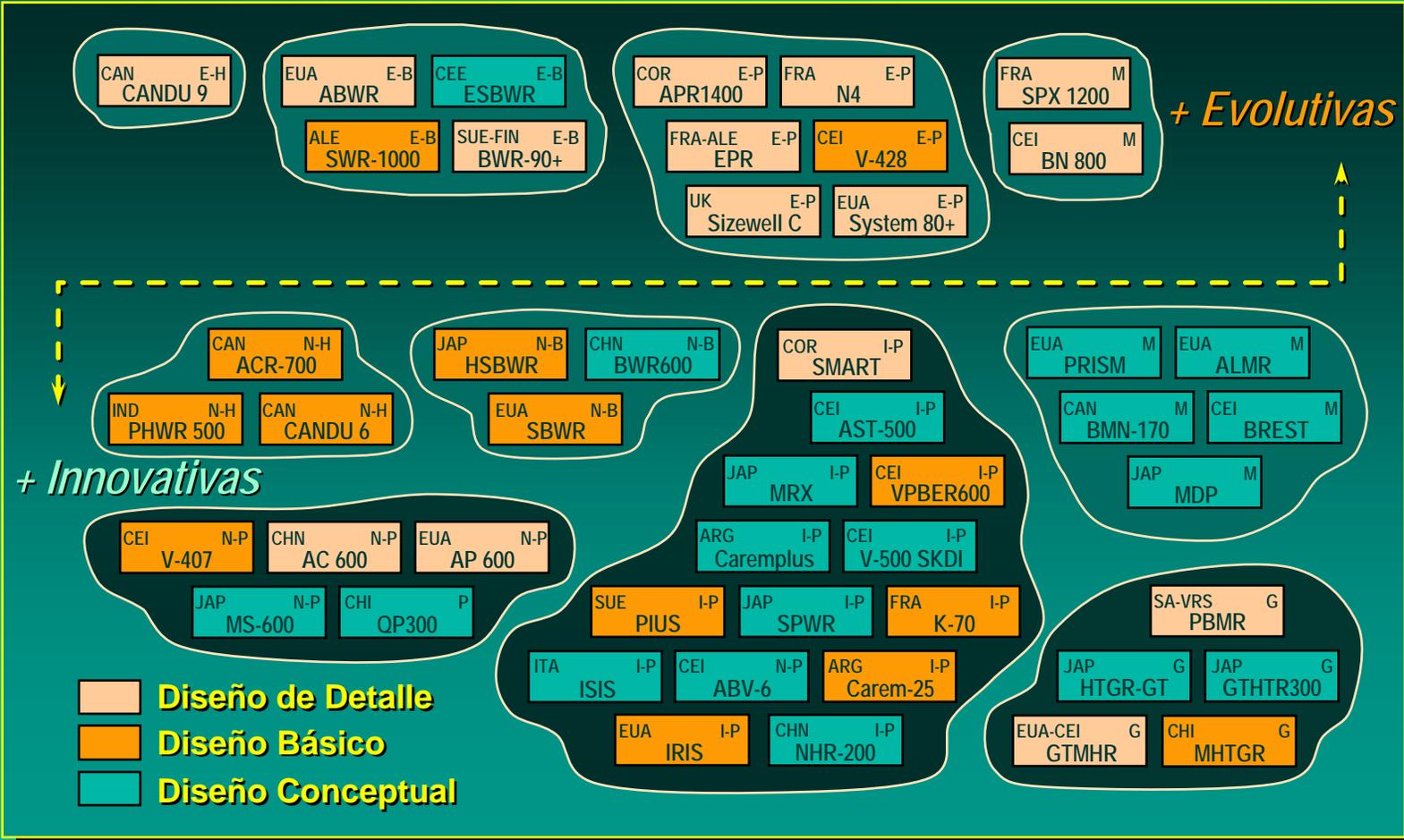
**Central de tamaño pequeño
(i.e. 4 x 286 MWe)**





Centrales Nucleares

Hay múltiples opciones de reactores avanzados





Centrales Nucleares



Ventajas generales de la energía nuclear

La energía nuclear es una opción más, con fortalezas y debilidades en el marco del desarrollo sustentable. En particular:

- Diversifica una matriz energética,
- Emite muy pocos GEI (indirecto),
- Estabiliza el precio de energía base,
- Asegura energía en el largo plazo,
- Aporta diversas tecnologías.



Centrales Nucleares



La disponibilidad explica parte de los costos

La potencia eléctrica instalada en el Mundo es de ~ **3500 GW**:

Fósil	~ 2300 GW	~ 10320 TWh	51%
Hidro	~ 680 GW	~ 2500 TWh	42%
Nuclear	~ 370 GW	~ 2630 TWh	81%
ERNC	~ 160 GW	~ 550 TWh	39%

Minihidro	~ 61 GW
Eólico	~ 48 GW
Biomasa	~ 39 GW
Geotermia	~ 9 GW
Solar directo	~ 4 GW
Mareomotriz	~ 0.3 GW

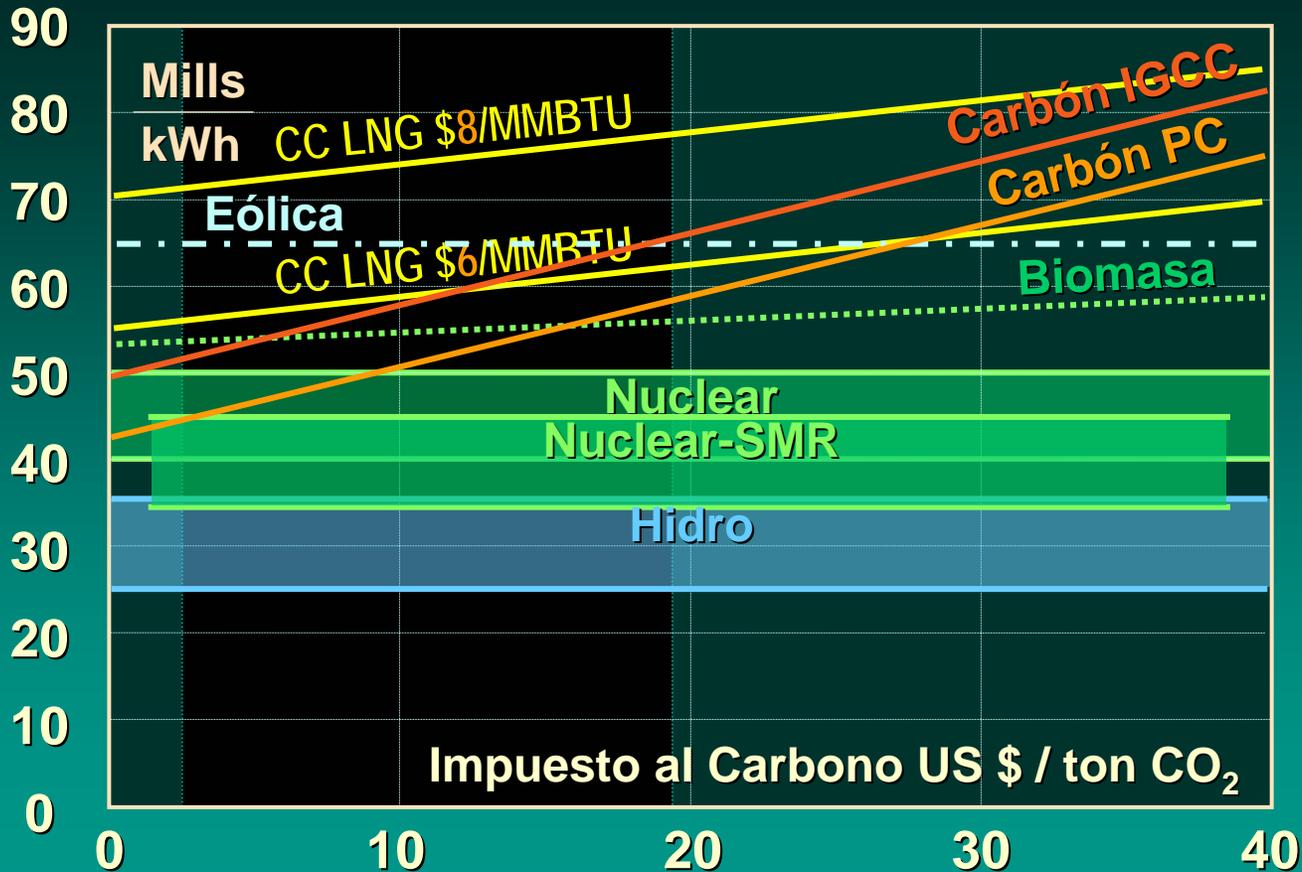
↑
Energía

↑
Uso



Centrales Nucleares

Costo comparado de opciones de generación





Centrales Nucleares



Sujeto a desventajas que requieren previsiones

Presenta diversos problemas, reales y/o aparentes, que hasta ahora han frenado su desarrollo efectivo. En particular:

- **Riesgo de accidente nuclear.**
- **Relación con proliferación de armas a través del combustible.**
- **Productos radiactivos de la fisión.**
- **Genera elementos pesados radio-tóxicos y persistentes (pocos).**



Centrales Nucleares

Entradas y salidas de dos plantas generadoras

Fósil (600 MW_e)

Alimentación
1.600.000 T

Desechos anuales
3.100.000 T CO₂
12.000 T SO_x
2.500 T NO_x
1.200 T partículas
+ alto impacto en mina

Deben Dispersarse
(en la atmósfera)

¿ ?
transporte

¿ ?
transporte

Nuclear (600 MW_e)

Alimentación
16.3 T

Desechos anuales
16 T (1/2 T) HLW
180 T ILW
280 T LLW
+ bajo impacto en mina

Pueden Confinarse
(en depósitos estables)

Centrales Nucleares



Qué significa 600 MW de energía fósil



4 viajes-año del **Knock Davis** (ULCC, 564.000 DWT).

6 viajes-año del **Berge Stahl** (OBC de 365.000 DWT).

8 viajes-año de un **LNGC** (Hay 182)

200 viajes-año de tren (90 carros)



Centrales Nucleares



Qué significa 600 MW de energía nuclear



2 camiones con 30 elementos combustibles (16 ton. uranio).

o

1 camioneta con deuterio (30 kg) de y tritio (40 kg) para **fusión**.



Centrales Nucleares

Desechos nucleares: pocos pero ruidosos





Aplicación a Chile



Chile: creciente economía en una región compleja

País más competitivo de la Región

Marco macro-económico fuerte, buen estándar de vida, bajo índice de riesgo, abierto al mundo, bajo nivel de inflación, etc.

Para seguir siendo competitivos, debemos crecer **~6+%** al año, lo que demanda: **Energía y Potencia, Base y Punta, Limpia y Barata.**



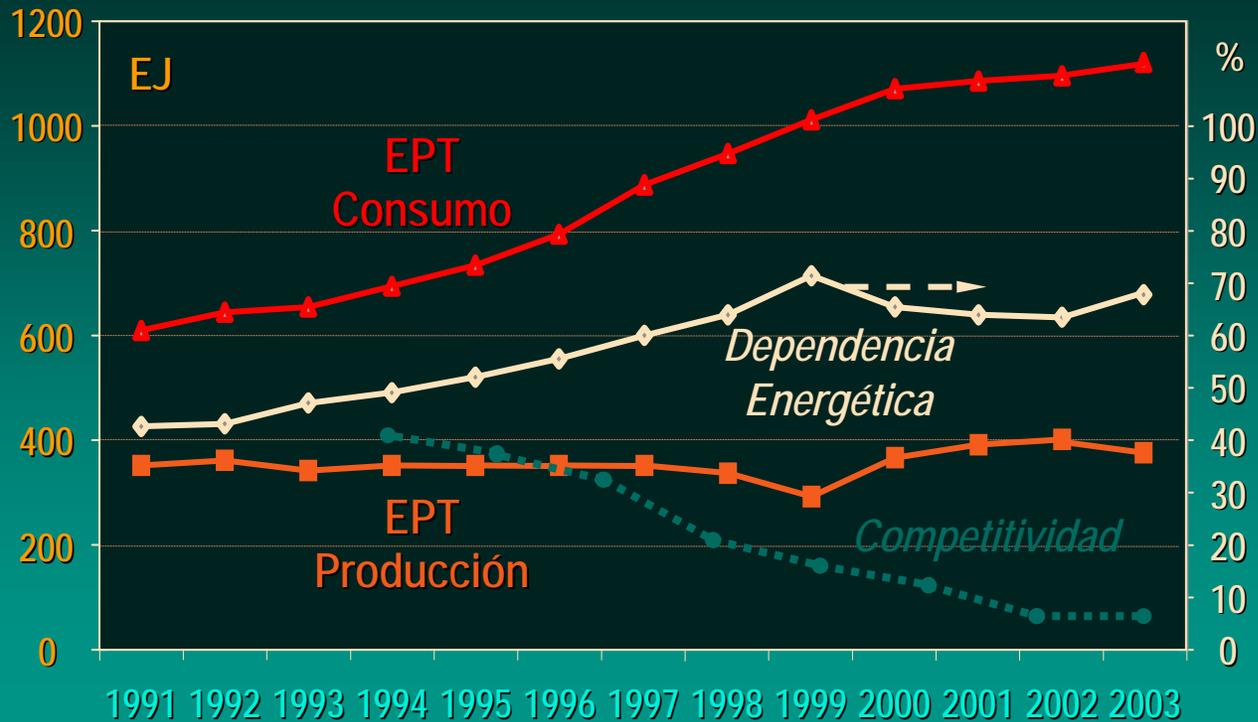


Aplicación a Chile



Lo que aumenta la dependencia energética

Energía Primaria Total





Aplicación a Chile



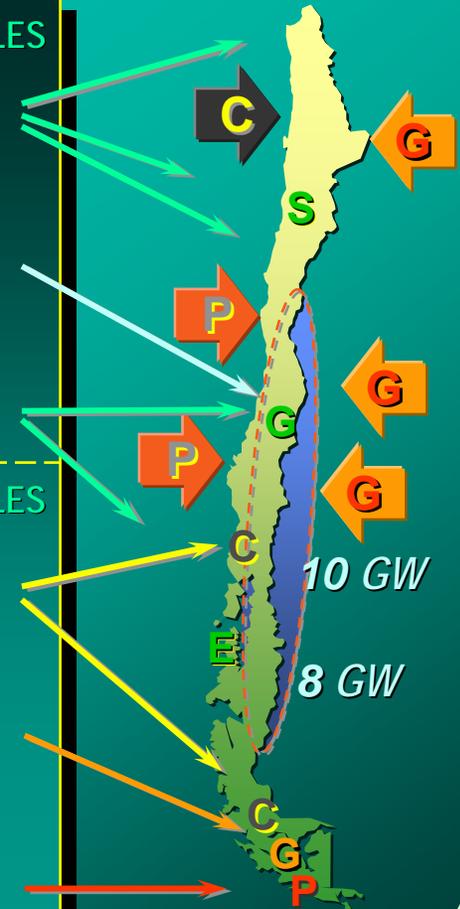
Con pocos recursos nacionales (oferta)

- **Uranio:**
 - 10% explorado, y pocos recursos evaluados
- **Hidroelectricidad:**
 - Utilizados 5 GW_e de un Potencial de 20+ GW_e
- **Otros Renovables:**
 - Oferta variable, según tecnología, 2+ GW_e

- **Carbón:**
 - Poco energéticos y caros, 80% externo
- **Gas Natural:**
 - Pocas reservas en Magallanes, 80% externo
- **Petróleo:**
 - Pocas reservas probadas, 94% externo

SOSTENIBLES

NO SOSTENIBLES





Aplicación a Chile



Gran disponibilidad de recurso nuclear natural

En el Mundo:

Tipo de Combustible	Recursos conocidos	Recursos totales
U (LWR), uso actual	320 años	8.300 años
U (LWR), reciclaje	370 años	9.400 años
U (LWR) + Pu (FBR)	500 años	12.500 años
U-Th (FBR), reciclaje	17.000 años	35.000 años
Pu-Th (FBR), reciclaje	10.000 años	250.000 años
D-T ó D-D (Fusión)	~inagotable	inagotable

En Chile:

7% explorado

1930 ton (RAR)

4688 ton (EAR)





Aplicación a Chile



Generación eléctrica: 4 sistemas independientes

6% # 11% PIB 3640 MW_e (100% fósil)

SING

92% # 86% PIB 7700 GW_e (60% hidro)

SIC

0.6% # 0.5% PIB 34 MW_e (65% hidro)

SA

1% # 2% PIB 78 MW_e (100% fósil)

SM





Aplicación a Chile



Hay nuevas condiciones para la energía nuclear

Se prevé una **Oferta** de nuevos reactores avanzados, más seguros, eficientes, flexibles y más competitivos:

- Reactores de gran tamaño, 1000-1600 MW, *i.e. AP1000, EPR, ESBWR, ACR1000, etc.*, disponibles en general ahora.
- Reactores de menor tamaño, 100-350 MW, *i.e. SMART, PBMR, GTMHR, IRIS, etc.* disponibles en general a contar del 2010.



Aplicación a Chile



Algunos reactores “evolutivos” disponibles

Nombre	Potencia	Fecha	Diseñador	País
Tipo PWR				
EPR	1600 MWe	2004	AREVA	Francia
APR1400	1400 MWe	2007	KHNP	Corea
AP1000	1114 MWe	2006	West-Tosh.	EUA-Japón
KSNP	1000 MWe	2006	KHNP	Corea
Tipo BWR				
ESBWR	1560 MWe	2006	GE	EUA
SWR	1200 MWe	2006	AREVA	Francia



Aplicación a Chile



Algunos reactores “innovativos” en desarrollo

Nombre	Potencia	Fecha	Diseñador	País
Tipo PWR				
IRIS	335 MWe	2014	West-Tosh.	EUA-Japón
CAREM	300 MWe	2020	CNEA	Argentina
SMART	200 MWe	2012	KHNP	Corea
Tipo HTGR				
GT-MHR	288 MWe	2015	GA	EUA
HTR-PM	190 MWe	2013	INET	China
PBMR	165 MWe	2012	PBMR	Sudáfrica



Aplicación a Chile

Opciones de ingreso en Chile

I) Con centrales Evolutivas:



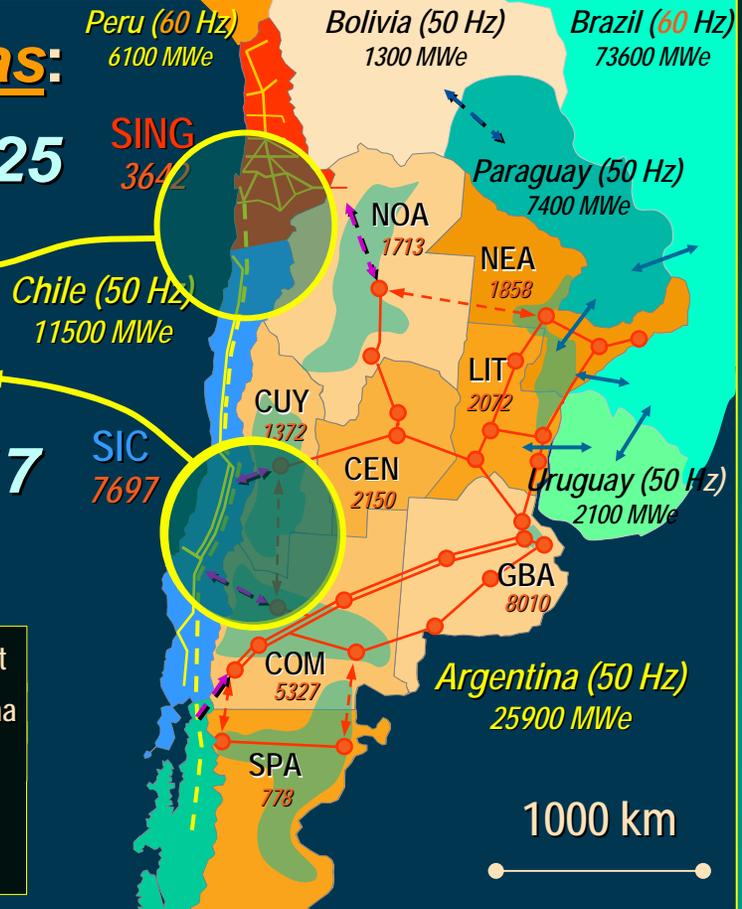
SING-SIC → 2015

SIC-SADI → 2014

SIC → 2017

SING → 2025

- Posible IC Chile-Argent
- Futura Red IC Argentina
- Red IC Argentina
- Posible Red Chilena
- Red Chilena Actual



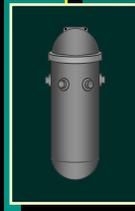
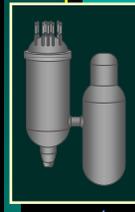


Aplicación a Chile



Opciones de ingreso en Chile

II) Con centrales Innovativas:





Aplicación a Chile



Ajuste entre Tecnologías y mercados

	Tecnologías	Unidades Clásicas	Unidades Evolutivas	Unidades Innovativas
Mercados	<i>Potencia Reactor</i> <i>Potencia Sistema</i>	P_U : Alrededor de 900 MW	P_U : Más de 1200 MW	P_U : Menos de 350 MW
SING	P_{inst} : 3596 MW P_{max} : 1570 MW P_{min} : 1480 MW	T_{reg} : 2021	T_{reg} : 2025	T_{reg} : 2018
SIC	P_{inst} : 8297 MW P_{max} : 5760 MW P_{min} : 2550 MW	T_{reg} : 2020	T_{reg} : 2020	T_{reg} : 2018

Plazo mínimo, si se inician actividades el 2010:

2018 (reactores innovativos)

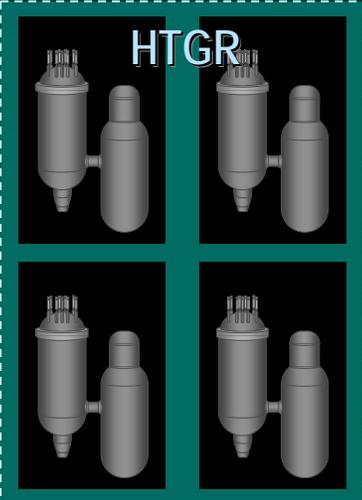
2020 (reactores evolutivos)



Aplicación a Chile

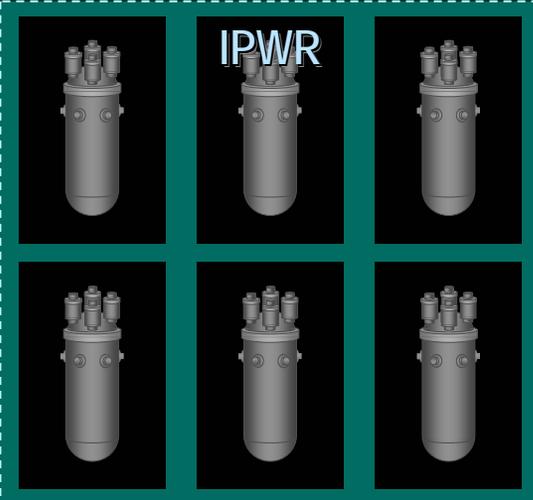
Escenario hipotético para Chile, en el año 2025-30

SING ~800 MW_e Gas Nat:



40%
Carbón:
44%
Hidro:
1%
Renov:
5%
Nuclear:
10%

SIC ~2000 MW_e Gas Nat:



15%
Carbón:
10%
Hidro:
60%
Renov:
5%
Nuclear:
10%

